

УДК 66.074:661

doi:10.20998/2413-4295.2017.53.17

**ОБРОБКА ГАЗОРИДИННИХ СИСТЕМ НА ТРУБЧАСТИХ РЕШІТКАХ ІЗ
СТАБІЛІЗАТОРОМ ПІННОГО ШАРУ****В. Ф. МОЇСЄЄВ, Є. В. МАНОЙЛО, М. І. ВАСИЛЬЄВ, К. Ю. РЕПКО, Д. В. ДАВИДОВ***каф. ХТПЕ, НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА
email: bublikova1@gmail.com

АНОТАЦІЯ Промислова реалізація методу стабілізації газорідного шару дозволяє значно розширити галузь застосування пінних апаратів і відкриває нові можливості інтенсифікації технологічних процесів з одночасним створенням маловідхідних технологій. У статті встановлені основні параметри, що впливають на гідродинаміку трубчастих решіток із стабілізатором піни і без нього. Виявлено зв'язок гідродинамічних параметрів. Отримані залежності точніше характеризують гідродинамічну обстановку в апараті. Наводиться вплив наявності стабілізатора на характеристики динамічного двухфазного шару. Розглянуто гідродинамічні закономірності пінного шару на трубчастих решітках зі стабілізатором піни і його вплив на роботу апарата. Показано, що використання стабілізатора знижує бризководнесення, а також збільшує ефективність виділення з газів компонентів, які важко уловити.

Ключові слова: промислові газові викиди; процес уловлювання; гідродинаміка, масообмін; пінний апарат; дослідження процесів очищення; стабілізація; пінний шар; інтенсивний апарат.

**PROCESSING OF GAS-LIQUID SYSTEMS ON TUBULAR GRATINGS WITH
STABILIZER OF A FOAM LAYER****V. MOISEEV¹, E. MANOILLO, M. VASYLIEV, K. REPKO, D. DAVIDOV***Department of Chemical techniques and industrial ecology, NTU «KhPI», Kharkiv, UKRAINE*

ABSTRACT The article is devoted to the study of hydrodynamic parameters in the processing of gas-liquid systems with stabilization of foam layer. The problem of processing industrial gas streams is solved by conducting the process in an intensive mode.

The industrial realization of a method of stabilization of gas liquid bed allows considerably to expand a field of application of frothy apparatuses and opens out new capabilities of an intensification of technological processes with simultaneous making of low-waste technologies. In the article the fundamental parameters influencing to hydrodynamics of tubular gratings with the stabilizing of foam and without it are highlighted. The connection of hydrodynamic quantities is revealed. The received relations characterize hydrodynamic conditions in the apparatus more precisely. The relations of gas content to a density of forced-circulation and velocity of gas, and also influence of availability of the stabilizing agent to performances of dynamical two-phase bed are resulted. Is considered sparks ablation on tubular gratings with the stabilizing of foam and its influence to activity of the apparatus.

Thus, the main result of the work is to update the technology of gas cleaning by the reduction of sparks ablation. It is reached by application of the padding stabilizing, which besides augments efficiency of separation from gases difficultly trapped components. The article establishes the basic parameters influencing the hydrodynamics of tubular lattices with and without a foam stabilizer. The connection of hydrodynamic parameters is revealed. The obtained dependencies more precisely characterize the hydrodynamic situation in the apparatus.

Key words: industrial gas emissions; catching process; hydrodynamics, mass transfer; foam apparatus; research of processes of clearing; stabilization; foam layer; intensive apparatus

Вступ

У наш час чітко визначилося напрямок, пов'язаний з проведенням дифузійних і подібних до них процесів в інтенсивних режимах розвинуеною турбулентності при великих швидкостях потоків газів і рідин. Саме турбулізація газорідної системи призводить до суттєвого збільшення інтенсивності масообмінних апаратів.

Одним із способів турбулізації системи газ – рідина є перетворення її в дуже рухливу нестабільну піну за рахунок кінетичної енергії газу. Пінний режим обробки газів і рідин став передовою ідеєю в хімічній технології. Пінний режим і пінні апарати «класичного» типу описані в роботах [1,2].

Інтенсифіковані апарати зі стабілізатором пінного шару знайшли широке застосування для уловлювання пилу з газів і для абсорбції газів в хімічній і суміжних галузях промисловості. Завдяки своїй високій ефективності, великої одиничної потужності, хорошим експлуатаційним якостям, їх застосування дозволяє вдосконалити стадії очищення газу в технологічних і санітарних цілях, збільшити ККД та підвищити надійність газоочисного устаткування.

Ціль роботи

Ціллю роботи є вивчення гідродинамічних параметрів при обробці газорідних систем зі стабілізацією пінного шару. Проблема обробки

промислових газових потоків вирішується за допомогою проведення процесу у інтенсивному режимі.

Промислова реалізація методу стабілізації газорідинного шару значно розширює сферу застосування пінних апаратів і відкриває нові можливості інтенсифікації технологічних процесів з одночасним створенням маловідхідних технологій.

Викладення основного матеріалу

Гідродинаміка трубчастих і близьких до них за характеристиками колосникових решіток без стабілізатора піни досить повно досліджена в ряді робіт [3-5] вітчизняних і зарубіжних дослідників [6-10]. Встановлено, що основний вплив на гідродинаміку зрошуваних решіток надають швидкість газу в повному перерізі апарату, W_z , вільний перетин решітки, S_0 , і щільність зрошення L_0 .

Зміна властивостей рідини і газу чинить менший вплив на гідродинаміку решіток. Так, зміна в'язкості рідини в межах від 0,1 до 2,3 Па не впливає на H , ΔP , φ_z .

Оскільки при абсорбції та очищенні газів параметри σ_p , μ_p , ρ_p незначно відрізняються від тих же параметрів для води, а μ_z , ρ_z – близькі за значеннями μ і ρ повітря, дослідження гідродинаміки трубчастих решіток із стабілізатором піни доцільно проводити на системі повітря-вода.

На рис. 1, а зображена схема потоків газу і рідини через трубчасту протитечіну решітку без стабілізатора, на рис. 1, б – зі стабілізатором пінного шару. З рис. 1, а видно, що мінімальний опір ΔP для проходу газу буде при висоті рідини над отвором – h_p , а гідравлічний напір, що викликає витікання рідини, дорівнює Δh . Швидкість витікання рідини з щілини визначають з рівняння:

$$W_{0p} = \mu_p \varphi_{0p} \sqrt{2g\Delta h} \quad (1)$$

де: W_{0p} – швидкість рідини в щілинах решітки, м/с; μ_p – коефіцієнт витрати через щілину.

Вирішуючи рівняння (1), отримаємо:

$$\Delta h = \frac{1}{2g} \left(\frac{W_{0p}}{\mu_p \varphi_{0p}} \right)^2 \quad (2)$$

Очевидно, що витікання рідини буде відбуватися при досягненні рівності:

$$(h_{жс} + \Delta h) \rho_p g = \Delta P + \Delta h \rho_p g, \quad (3)$$

де: $\rho_{жс}$ – щільність рідини, кг/м³; ΔP – гідравлічний опір зрошуваної трубчастої решітки, Па.

Розподіл потоків на решітці обчислюємо з умови витрати мінімуму енергії на подолання гідравлічного опору решітки газом або на створення різниці рівнів на решітці згідно рис. 1 а.

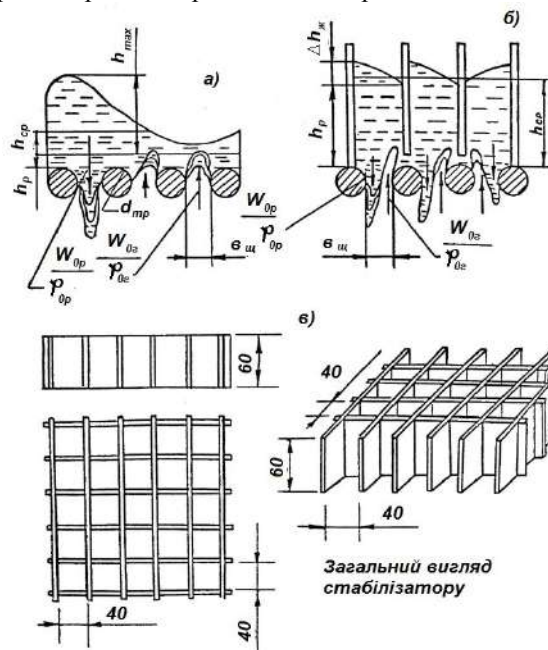


Рис. 1 – Схема проходження потоку газу і рідини через трубчасту решітку: а – без стабілізатора піни; б – із стабілізатором піни; в – стабілізатор піни

Під час роботи решітки в пінному режимі при збільшенні W_z і незмінній щільності зрошення повинна збільшитися частка перетину решітки, зайнята газом φ_{0z} , і знизиться частка перетину, зайнята стікаючою рідиною φ_{0p} . Для протікання незмінної кількості рідини крізь ґрати повинна збільшитися швидкість витікання рідини. У свою чергу, швидкість витікання рідини може збільшитися тільки при збільшенні Δh тобто при збільшенні гребенів хвилі на поверхні шару піни. Особливо помітно збільшення Δh стає при хвилювому режимі.

Визначаючи нижню межу роботи трубчастих решіток без стабілізатора, отримаємо наступне рівняння:

$$W_{0z} = 8,1 \left(\frac{\sigma_{ш}}{L_0} \right)^{0,5} d_{mp}^{0,33} \quad (4)$$

Як відомо, для початку роботи решітки на ній необхідно створити певний запас рідини. Встановлено, що трубчасті решітки мають більшу провалюючу здатність, ніж сітчасті і колосникові. Тому для початку роботи трубчастих решіток необхідні великі навантаження по газу і рідині. При певних значеннях вільного перетину решітки та щільності зрошення піноутворення починається при певній швидкості газу в повному перерізі апарату.

Мінімальну швидкість газу, при якій на решітці починає утворюватися пінний шар, назовемо критичною швидкістю $W_{з,кр}$.

Результати дослідів показали, що при постійній щільності зрошення для початку роботи решітки потрібно тим більша швидкість, чим більше вільний перетин решітки (рис. 2). З рисунку 2 видно, що протитечієві трубчасті решітки зі стабілізатором починають працювати при значно менших значеннях $W_{з,кр}$, ніж грати без стабілізатора. Крім того, протитечієві трубчасті решітки без стабілізатора не працюють при щільності зрошення менше $3 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{год}$, тоді як грати зі стабілізатором стійко працюють при щільності зрошення $0,6 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{год}$. Вплив діаметра трубок під час проведення дослідів не було виявлено. Математична обробка даних призводить до залежності, м/с:

$$W_{з,кр} = 372 S_0^{3,0} L_0^{0,3} \quad (5)$$

Відхилення експериментальних значень $W_{з,кр}$ від розрахункових складає $\pm 8,6\%$.

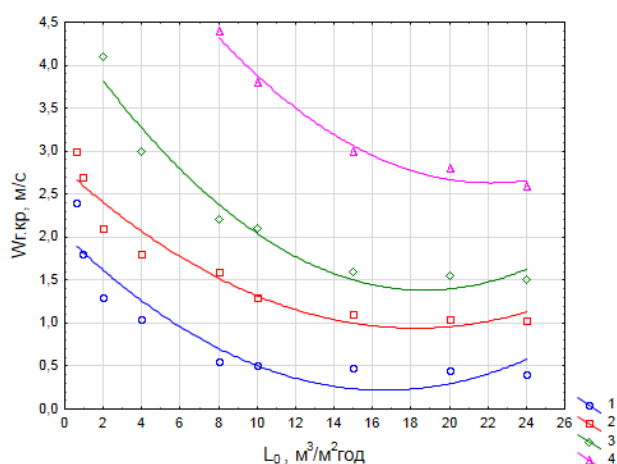


Рис. 2 – Залежність нижньої межі роботи трубчастих грат від щільності зрошення. S_0 : 1, 3 – 0,152; 2, 4 – $0,192 \text{ м}^2/\text{м}^2$; $d_{тр} = 0,02 \text{ м}$; 3, 4 – зі стабілізатором, 1, 2 – без стабілізатора

Порівняння режимів роботи зі стабілізаторами і без нього показує, що застосування стабілізатора значно розширює діапазон стійкої роботи трубчастих решіток в пінних апаратах. Ця обставина важлива при обробці технологічних газів з сушильних печей, реакторів та інших видів обладнання, кількість газів, що видаляються може змінюватися в широких межах в залежності від потреб технології.

Висота шару піни. Одним з основних показників гідродинамічних режимів роботи пінного апарату служить висота піни H . Висота піни дозволяє судити про розвиток поверхні контакту фаз, про гідродинамічні та конструктивні параметри апарату. Слід зазначити, що залежності, що були

отримані раніше дослідниками при швидкості газу в пінному перетині апарату не більше 2 м/с . У вивчених нами межах $W_z = 1,8 - 4,5 \text{ м/с}$ для трубчастих решіток без стабілізатора отримана формула

$$H = 1,19 \cdot 10^{-3} W_z^{1,2} L_0^{0,25} S_0^{-1,4} \quad (6)$$

Розрахунки H , виконані за відомими залежностями та (6), при швидкостях газу в повному перетині апарату до 2 м/с приблизно збігаються. Однак при $W_z = 3 - 4 \text{ м/с}$ розрахунки H , виконані за відомим залежностям перевищують експериментальні значення H на $80 - 100\%$, в той час як величини, розраховані за формулою (6), відрізняються від експериментальних на $9,5\%$.

Дослідження, проведені нами на трубчастих решітках зі стабілізатором піни, показали, що так само, як і на решітках без стабілізатора, при збільшенні швидкості газу в повному перерізі апарату висота шару піни неухильно зростає (рис. 3). При цьому H на решітках зі стабілізатором вище, ніж на решітках без стабілізатора (рис. 3, рис. 4) при одних і тих же значеннях W_z, S_0, L_0 . На решітках зі стабілізатором чіткіше, ніж без стабілізатора, виражена межа пінного шару, що дозволяє точніше визначити висоту шару піни.

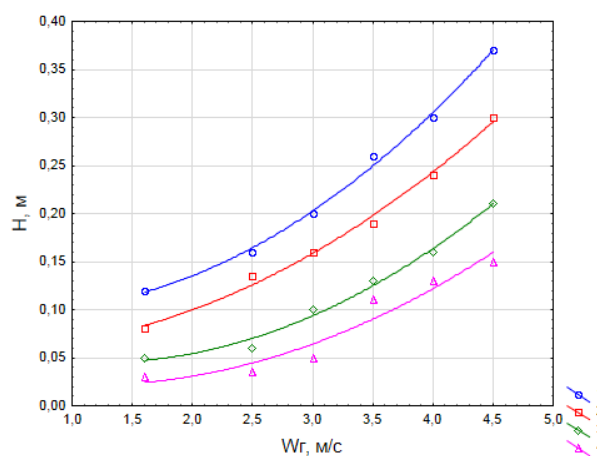


Рис. 3 – Залежність висоти шару піни від швидкості газу в повному перерізі апарату: $d_{тр} = 0,03 \text{ м}$; L_0 : 1 – 20; 2, 3, 4 – $5 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{год}$; S_0 : 1, 2 – 0,142; 3, 4 – $0,169 \text{ м}^2/\text{м}^2$; 4 – зі стабілізатором, 1, 2, 3 – без стабілізатора

На решітках без стабілізатора пінний шар зазвичай не має чітко вираженої межі, і амплітуда коливань пінного шару може перевищувати навіть середні значення висоти шару. Ймовірно, цим пояснюється надзвичайно великий розкид значень висоти піни (за даними різних авторів). За візуальними спостереженнями на решітках зі стабілізатором піна щільніша і більш однорідна, ніж на решітках без стабілізатора, в ній відсутні газові

порожнечі, практично немає розгойдування газорідного шару в усьому дослідженому діапазоні швидкостей.

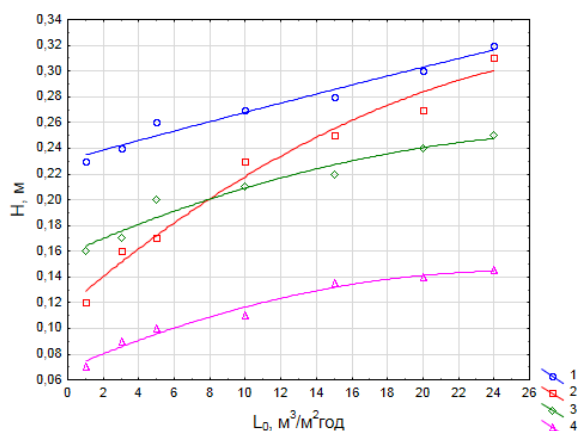


Рис. 4 – Залежність висоти шару піни від щільності зрошення. $S_0 = 0,142 \text{ м}^2/\text{м}^2$; $d_{mp} = 0,03 \text{ м}$, W_z : 1, 2 – 4; 3 – 3,0; 4 – 2,0 м/с; 2 - зі стабілізатором, 1, 3, 4 – без стабілізатора

Залежність висоти шару піни від іншого гідродинамічного фактора L_0 показана на рис. 4, з якого видно, що криві, які виражають залежність $H = f(L_0)$ на решітках зі стабілізатором, мають менший кут нахилу, ніж аналогічні криві для решіток без стабілізатора. Також відзначено, що при малих щільності зрошення порядку $1\text{--}5 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{год}$ висота шару піни на решітках зі стабілізатором в $1,5\text{--}2$ рази перевищує висоту шару піни на решітках без стабілізатора. У міру збільшення щільності зрошення відмінності в висоті шару піни для решіток із стабілізатором і без нього стають незначними, досягаючи при $L_0 = 24 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{год}$ лише 10% . Таким чином застосування стабілізатора найбільш ефективно в області малих значень щільності зрошення, тобто в області малої стійкості роботи трубчастих решіток.

Для трубчастих решіток із стабілізатором була отримана залежність висоти пінного шару від основних факторів:

$$H = 1,43 \cdot 10^{-3} W_z^{1,2} L_0^{0,2} S_0^{-1,6} \quad (7)$$

Похибка розрахунків за формулою (7) не перевищує $\pm 7,3\%$. Порівнюючи залежності (6) і (7), можна бачити, що висота шару піни на трубчастих решітках зі стабілізатором більшою мірою залежить від вільного перетину решіток, ніж на решітках без стабілізатора і в дещо меншій мірі – від щільності зрошення. Збільшення висоти шару піни на решітках зі стабілізатором і її більш інтенсивна турбулізація створюють передумови для більш ефективного уловлювання погано розчинних газових компонентів в хімічній технології.

Висота вихідного шару рідини є одним з найбільш істотних факторів, що впливають на процеси тепло- масопередачі і пиловловлювання в пінних апаратах. Від висоти вихідного шару рідини в значній мірі залежить гідравлічний опір решіток із шаром пилу, час перебування рідини на решітці, висота шару піни.

При вивченні роботи пінних і барботажних апаратів різних конструкцій приділяли велику увагу визначенню параметрів, від яких залежить h_0 , розробляли способи і пристрої для створення і підтримки певної висоти вихідного шару рідини. Проте, визначенню висоти вихідного шару рідини на протитечієвих решітках приділялося значно менше уваги, ніж на інших типах решіток. Наявні в літературі дані дозволяють встановити фактори, що впливають на висоту вихідного шару рідини на протитечієвих решітках. Для умов роботи протитечієвих дірчастих решіток отримана залежність:

$$h_0 = f(W_z, L_0, S_0, d_0) \quad (8)$$

Для трубчастих решіток із стабілізатором піни можна записати:

$$h_0 = f(W_z, L_0, S_0, d_{mp}) \quad (9)$$

Розглянемо вплив параметрів залежності (9) на h_0 .

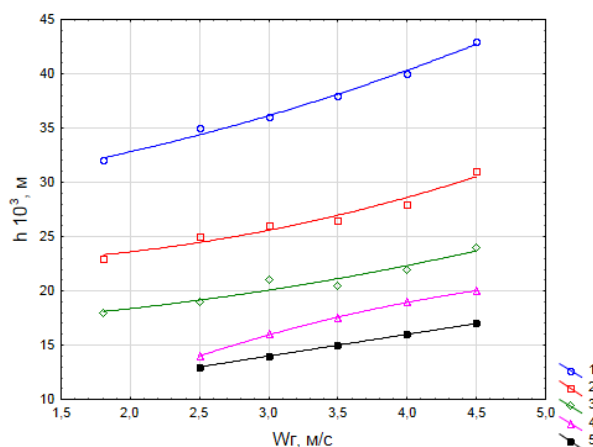


Рис. 5 – Залежність висоти вихідного шару рідини від швидкості газу в повному перерізі апарату: $L_0 = 5 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{год}$; d_{mp} : 1 – 0,03; 2, 3, 4 – 0,027; 5 – 0,02 м; S_0 : 1 – 0,142; 2, 4 – 0,169; 3 – 0,20; 5 – 0,233 $\text{м}^2/\text{м}^2$; 4 – зі стабілізатором, 1, 2, 3, 5 – без стабілізатора

Як показали експерименти на модельній установці, висота вихідного шару рідини неухильно зростає при збільшенні швидкості газу в повному перерізі апарату від $1,8$ до $4,5 \text{ м/с}$ (рис. 5). З порівняння значень точок на кривих 2 і 3 можна

бачити вплив стабілізатора на висоту вихідного шару рідини. Так, при одній і тій же швидкості газу значення h_0 на решітці $\text{м}^2/\text{м}^2$ зі стабілізатором (крива 2) більш ніж в 2 рази перевищує значення h_0 на решітці без стабілізатора піни (крива 4).

Вплив вільного перетину решітки на висоту вихідного шару рідини на трубчастих решітках має велике значення (рис. 6).

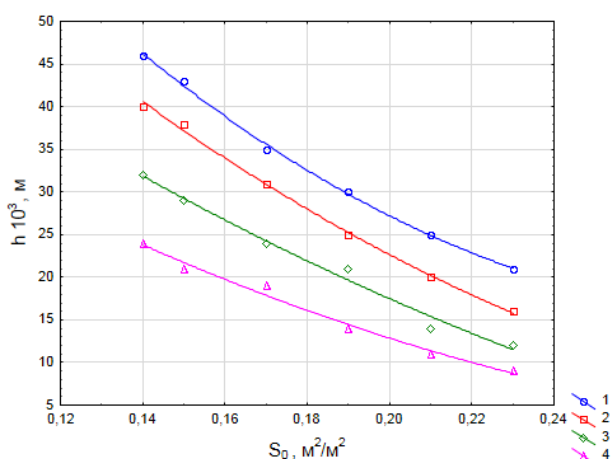


Рис. 6 – Залежність висоти вихідного шару рідини від вільного перетину решітки. W_z : 1, 3 – 2; 2, 4 – 4 м/с; L_0 : 1 – 15; 2, 3, 4 – 5 $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{год}$; 4 – зі стабілізатором, 1, 2, 3 – без стабілізатора

З рисунку 6 видно, що збільшення вільного перетину трубчастої решітки зі стабілізатором в 1,5 рази призводить до зниження висоти вихідного шару рідини на решітці приблизно в 2 рази (криві 1, 2, 3). Разом з тим крива 3, що виражає залежність висоти вихідного шару рідини від вільного перетину решітки без стабілізатора, має дещо менший кут нахилу. Крива 4 проходить значно нижче, ніж крива 2, тобто при даних одних і тих же значеннях швидкості газу в повному перерізі апарату і щільності зрошення в усьому дослідженому матеріалі вільних перетинів решіток, висота вихідного шару рідини на трубчастих решітках зі стабілізатором вище, ніж на решітках без стабілізатора. Таким чином, для створення одиниці h_0 на решітках зі стабілізатором непродуктивні витрати на подолання опору сухої решітки нижче, ніж без стабілізатора.

Певний вплив на висоту вихідного шару рідини надає і щільність зрошення. З цього рис. 7 можна бачити, що вихідний шар рідини при використанні стабілізатора вище, ніж без стабілізатора. Особливо помітний ефект від застосування стабілізатора при малої щільності зрошення (до 5–8 $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{год}$), де висота вихідного шару рідини на решітках зі стабілізатором в 1,5–2 рази вище, ніж без нього. Залежність висоти вихідного шару рідини від щільності на трубчастих решітках зі стабілізатором з урахуванням всіх факторів:

$$h_{0c} = 0,75 \cdot 10^{-3} W_z^{0,25} L_0^{0,3} S_0^{-1,6} \quad (10)$$

Відхилення величин h_0 , отриманих за рівнянням (10), відрізняється від експериментальних значень не більше ніж на $\pm 6,7\%$. Для трубчастих решіток без стабілізатора була отримана наступна формула:

$$h_0 = 0,38 \cdot 10^{-3} W_z^{0,36} L_0^{0,57} S_0^{-1,4} \quad (11)$$

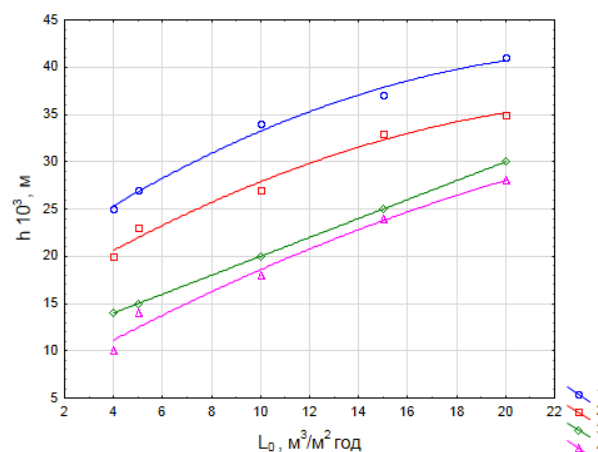


Рис. 7 – Залежність висоти вихідного шару рідини від щільності зрошення. S_0 : 1, 2, 4 – 0,171; 3 – 0,211 $\text{м}^2/\text{м}^2$; W_z : 1 – 4, 2, 3, 4 – 2 м/с; 4 – зі стабілізатором, 1, 2, 3 – без стабілізатора

Як видно з формул (10) і (11), на висоту вихідного шару рідини на решітках зі стабілізатором швидкість газу в повному перерізі апарату і щільність зрошення впливають менше, ніж на трубчастих решітках без стабілізатора. Тим часом величина вихідного шару рідини на решітках зі стабілізатором значно більше, ніж на решітках без стабілізатора. Збільшення h_0 , як і H на трубчастих решітках зі стабілізатором в порівнянні з решітками без стабілізатора дозволяє використовувати трубчасті решітки для очищення газів і отримання розчинів в у широкому спектрі технологій.

Гідравлічний опір трубчастих грат. На гідродинаміку зрошуваних решіток основний вплив роблять швидкість газу в повному перерізі апарату, щільність зрошення і вільний перетин решіток. Вивчення нами висоти шару піни і висоти вихідного шару рідини на трубчастих решітках зі стабілізатором піни підтвердило вплив таких параметрів як W_z, S_0, L_0, d_{mp} на H, h_0 . З огляду на отримані залежності для H, h_0 , а також дані інших авторів за розрахунками загального гідравлічного опору зрошуваних решіток P , можна записати для системи повітря – вода:

$$\Delta P = f(W_z, L_0, S_0, d_{mp}) \quad (12)$$

Оскільки значення H, h_0 в разі застосування стабілізатора перевищують H, h_0 без нього, цілком закономірно було б очікувати, що і зрошуваних трубчастих решіток із стабілізатором виявиться вище гідравлічного опору зрошуваних решіток без стабілізатора.

Гідравлічний опір решіток із шаром піни ΔP , більшість дослідників поділяють на складові:

$$\Delta P = \Delta P_{cp} + \Delta P_{\sigma} + \Delta P_{cl} \quad (13)$$

де: ΔP_{cp} – гідравлічний опір сухої решітки, Па; ΔP_{σ} – гідравлічний опір, що виникає за рахунок сил поверхневого натягу при виході газу з щілин, Па; ΔP_{cl} – гідравлічний опір пінного шару, Па.

Гідравлічний опір сухих трубчастих решіток є сумою втрат на стиск струменя при вході в отвори, втрат на тертя в отворах, втрат на розширення струменя при виході з отвору. Гідравлічний опір трубчастих решіток може бути виражено залежністю:

$$\Delta P_{cp} = f(Re_0, S_0), \quad (14)$$

З формули (14) випливає, що на ΔP_{cp} може впливати d_{mp} оскільки при постійному вільному перетині решітки ширина щілини буде залежати від діаметра трубок, а в результаті зміни щілини буде змінюватися Re_0 . Опір сухої решітки зазвичай виражають формулою

$$\Delta P_{cp} = \xi_{0z} \frac{\rho_z W_0^2}{2}, \quad (15)$$

де ρ_z – щільність газу, кг/м³. ξ_{0z} – коефіцієнт місцевого опору, віднесений до швидкості газу в щілинах решітки.

У загальному випадку коефіцієнт місцевого опору залежить від критерію Рейнольдса і величини вільного перетину решіток. Вид залежності $\xi_{0z} = f(Re_0)$ змінюється від характеру руху газу. При ламінарному режимі, коли $\Delta P \approx W_z$

$$\xi_{0z} = \frac{C}{Re_0} \quad (16)$$

де C – постійна.

При турбулентному режимі, коли, $\Delta P \approx W_z^{1,75}$

$$\xi_{0z} = \frac{C_1}{Re_0^{0,25}} \quad (17)$$

І при режимі розвинутою турбулентності, що є автомодельним, коли $\Delta P \approx W_0^2$

$$\xi_{0z} = \frac{C_2}{Re_0^0}$$

Показано, що автомодельний режим в пінних апаратах настає вже при $W_z \geq 1,2$ м/с, тобто практично з самого початку пінного режиму. Можна зробити висновок, що при пінному режимі ξ_{0z} не залежить від ширини щілини при незмінному S_0 і швидкості газу в щілинах решітки. Вивчення впливу вільного перетину решітки на коефіцієнт місцевого опору призводить до залежності, яка виражається формулою:

$$\xi_{0z} = 0,273 S_0^{-0,55} \quad (18)$$

Відхилення значень ξ_{0z} , розрахованих по (18), від експериментальних складають $\pm 3,9\%$.

У промислових пінних апаратах визначення вільного перетину трубчастих решіток і їх коефіцієнтів місцевих опорів представляє відомі труднощі. Визначення вільного перетину трубчастих решіток лабораторних пінних апаратів також важко, так як ширина щілини в таких решітках дорівнює 1,0–2,5 мм, і помилки вимірів порядку 0,1–0,2 мм можуть привести до серйозних погрешностей у визначенні S_0 та ξ_{0z} . Для визначення вільного перетину трубчастих решіток за відомим ΔP_{cp} були знайдені коефіцієнти місцевих опорів, віднесені до швидкості газу в повному перерізі апарату ξ_{nz} з виразу:

$$\Delta P_{cp} = \xi_{nz} \frac{\rho_z W_z^2}{2} \quad (19)$$

Вільний перетин решіток при цьому визначали методом просвічування решіток паралельним пучком світла, що дозволяє вимірювати більш точно S_0 , ніж за допомогою механічних вимірів. Характер залежності $\xi_{nz} = f(S_0)$ описується рівнянням:

$$\xi_{nz} = 0,273 S_0^{-2,55} \quad (20)$$

Відхилення значень ξ_{nz} , розрахованих за рівнянням (20) складають $\pm 4,1\%$ від експериментальних. Користуючись рівнянням (26), можна по заміряному ΔP_{cp} і обчисленому по (19) ξ_{nz} знайти вільний перетин трубчастої решітки без безпосереднього виміру ширини щілин. Установка стабілізатора піни на решітку практично не змінює гідравлічний опір сухої решітки, оскільки вільний перетин стабілізатора складає 0,95–0,98 м²/м².

Гідравлічний опір, що виникає за рахунок шару сил поверхневого натягу. Втрати тиску на подолання сил поверхневого натягу рідини ΔP_{σ} виникають при виході газу з отворів і вході газу в шар рідини на решітці. Для трубчастих решіток в

знаменнику формули замість $e_{\text{ш}}$ повинно стояти $(d_{\text{мп}} + e_{\text{ш}})$, а сама формула для втрат тиску набуває вигляду:

$$\Delta P = \frac{2\sigma}{d_{\text{мп}} + e_{\text{ш}}} \quad (21)$$

де σ – коефіцієнт поверхневого натягу, Н/м; $e_{\text{ш}}$ – ширина щілини між колосниками, м.

Розраховані за відомою формулою значення ΔP_{σ} для системи повітря – вода лягають в координатах $\Delta P_{\sigma} - S_0$ на прямі, які описуються рівнянням

$$\Delta P_{\sigma} = 7,6 \cdot 10^{-6} S_0^{-0,23} d_{\text{мп}}^{-1,0} \quad (22)$$

Для інших систем рівняння набуде вигляду:

$$\Delta P_{\sigma} = 1,02 \cdot 10^{-3} \sigma_{\text{ж}} S_0^{-0,23} d_{\text{мп}}^{-1,0} \quad (23)$$

Гідравлічний опір пінного шару. З трьох складових (13) загального гідравлічного опору зрошуваної решітки $\Delta P_{\text{сп}}, \Delta P_{\sigma}, \Delta P_{\text{кл}}$, дві перших складових вважають непродуктивними витратами напору. На створення власне шару піни витрачається втрата напору $\Delta P_{\text{кл}}$. При розрахунку $\Delta P_{\text{кл}}$ по відомим залежностям не завжди відома величина вихідного шару рідини, в результаті чого розрахунок $\Delta P_{\text{кл}}$ представляє певні труднощі. Розрахунок протитечієвих решіток можна вести за формулою:

$$\Delta P_{\text{кл}} = 0,5 \cdot \xi_n W_z^2 \rho_z S_0^{-2} \varphi_{0,z}^{-2} \quad (24)$$

де ξ_n – коефіцієнт гідравлічного опору при проходженні газами шару піни, $\varphi_{0,z}$ – частка щілини решітки, зайнята газом.

Відома формула для розрахунку решітки з прутків діаметром 3–5 мм:

$$\Delta P_{\text{кл}} = 2,9 W_z^2 \left(\frac{\rho_z}{S_0^2} \right) \left(\frac{L}{G} \right)^{0,4} \left(\frac{\rho_z}{\rho_p} \right)^{0,2} \quad (25)$$

Величину $\Delta P_{\text{кл}}$ можна знайти з (13), якщо відомі $\Delta P, \Delta P_{\text{сп}}, \Delta P_{\sigma}$:

$$\Delta P_{\text{кл}} = \Delta P - \Delta P_{\text{сп}} - \Delta P_{\sigma} \quad (26)$$

Загальний гідравлічний опір зрошуваної трубчастій решітки для системи повітря – в да можна визначити за формулою

$$\Delta P = 9,5 W_z^{0,85} L_0^{0,1} S_0^{-1,6} \quad (27)$$

Гідравлічний опір сухої решітки при наявності зрошення визначають з урахуванням частки перетину, зайнятої газом:

$$\Delta P_{\text{сп}} = \frac{\xi_{0,z} W^2 \rho_z}{2 S_0^2 \varphi_{0,z}^2} \quad (28)$$

$$\varphi_{0,z} = 1 - \frac{\left[\left(\frac{L}{G} \right)^2 \frac{\rho_z}{\rho_p} \frac{\beta_p}{\xi_{0,z} \mu_p} \right]^{0,33}}{1 + \left[\left(\frac{L}{G} \right)^2 \frac{\rho_z}{\rho_p} \frac{\beta_p}{\xi_{0,z} \mu_p} \right]^{0,33}} \quad (29)$$

де L – витрата рідини в апараті, кг/год; G – витрата газу через апарат, кг/год; β_p – відношення середнього статистичного тиску газорідинного шару в зоні стікання рідини через отвори. Для системи повітря – вода автори ряду робіт рекомендують $\beta_p = 0,5$; для пінних рідин рекомендують:

$$\beta_p = 1,11 \left(\frac{\rho_z}{\rho_{\text{ж}}} \right)^{0,118} \quad (30)$$

де μ_p – коефіцієнт витікання рідин. Для колосникових решіток багато авторів приймають $\mu_p = 0,62$, тобто як «коефіцієнт витрати через отвір у тонкій стінці». Однак, як справедливо відзначається всіма авторами, вивчили трубчасті решітки, форма отворів трубчастих решіток відрізняється від форми отворів колосникових решіток. Тому для трубчастих решіток слід приймати $\mu_p = 0,97$ – «коефіцієнт витрати через короткий циліндричний патрубок з добре закругленими краями».

Враховуючи що

$$L = L_0 S \rho_p, \quad (31)$$

$$G = 3600 W_z S \rho_z \quad (32)$$

и приймаючи $\beta_p = 0,5$, після математичних перетворень отримаємо для системи повітря – вода:

$$\varphi_{0,z} = \frac{1}{1 + 0,038 L_0^{0,67} \xi_{0,z}^{-0,33} W_z^{-0,67}} \quad (33)$$

Для інших систем, приймаючи $\beta_p = 1,11 \left(\frac{\rho_z}{\rho_p} \right)^{0,118}$ отримаємо:

$$\varphi_{0,z} = \frac{1}{1 + 0,045 L_0^{0,67} W_z^{-0,67} \xi_{0,z}^{0,33} \rho_z^{0,37} \rho_p^{-0,37}} \quad (34)$$

комбінуючи залежності (27), (28), (33) для системи повітря-вода можемо записати:

$$\Delta P_{cl} = 9,5W_z^{0,85}L_0^{0,1}S_0^{-1,6} - \frac{0,35S_0^{-2,55}W_z^2}{1 + 0,059W_z^{-0,67}L_0^{0,67}S_0^{0,18}} - 7,6 \cdot 10^6 S_0^{-0,23}d_{mp}^{-1,0} \quad (35)$$

З формули (35) видно, що

$$\Delta P_{cl} = f(W_z, L_0, S_0, d_{mp}) \quad (36)$$

Обробка експериментальних даних дозволила нам отримати наступну залежність:

$$\Delta P_{cl} = 2,36W_z^{0,25}L_0^{0,3}S_0^{-1,6} \quad (37)$$

Порівнюючи (10) і (37), можна помітити, що

$$\Delta P_{cl} = h_0 9,81 \cdot 1000 \quad (38)$$

Оскільки 9,81 є величина прискорення вільного падіння тіл м/с², а 1000 – величина щільності води кг/м³ для системи повітря – вода можна записати:

$$\Delta P_{cl} = h_0 g \rho_p \quad (39)$$

Таким чином, для трубчастих решіток підтверджується отримана раніше іншими авторами залежність. Для визначення ΔP на решітках без стабілізатора була отримана формула

$$\Delta P = 10,7W_z^{0,66}L_0^{0,32}S_0^{-1,4} \quad (40)$$

З порівняння (27) і (40) видно, що на загальний гідрравлічний опір трубчастих решіток із стабілізатором W_z і S_0 роблять більший, а L_0 – менший вплив, ніж без стабілізатора піни.

Очевидно, це залежить від створюваного на решітці без стабілізатора вихідного шару рідини, на величину якого L_0 впливає більшою мірою, ніж на решітках зі стабілізатором. Помічену раніше можливість роботи в хвильовому режимі решіток без стабілізатора при підвищенні щільності зрошення можна пояснити стабілізуючою дією високого вихідного шару рідини на решітці. Про це говорять зображені гідродинамічні показники трубчастих решіток із стабілізатором і без нього при щільності зрошення понад 20 м³/м²-год. За результатами досліджень були побудовані номограми для розрахунку пінних апаратів з трубчастими решітками зі стабілізатором піни.

Обговорення результатів

Залежності висоти шару піни на трубчастих решітках від швидкості газу в повному перерізі

апарату, отримані нами при постійних значеннях h_0 , показані на рис.8. Видно, що при однакових значеннях висоти вихідного шару рідини висота шару на

Однаковий ж вихідний шар рідини на решітці без стабілізатора можна отримати при меншому вільному перетині решітки в порівнянні з решітками зі стабілізатором. В цьому випадку гідрравлічний опір сухої решітки, тобто мимовільні витрати енергії будуть вище, ніж при використанні решітки зі стабілізатором. Крім того, більший вільний перетин решітки зі стабілізатором при тому ж самому діаметрі труб, що і без стабілізатора, дозволить мати велику ширину щілин в решітці, і, як наслідок, підвищить надійність роботи технологічних ліній, що обробляють гази, що містять пил, схильний до злипання, і розчини, які містять речовини, що кристалізуються. Залежності для решіток із стабілізатором (рис. 8) апроксимуються виразом

$$H = 1,91h_0W_z^{0,95}L_0^{-0,1} \quad (41)$$

Для решіток без стабілізатора:

$$H = 3,6h_0W_z^{0,84}L_0^{-0,32} \quad (42)$$

З формул (41) і (42) видно, що вплив щільності зрошення на висоту шару піни при певній висоті вихідного шару рідини на трубчастих ґратах зі стабілізатором істотно менше, ніж на решітках без стабілізатора. Виявлено вплив на висоту піни щільності зрошення, особливо на решітках без стабілізатора.

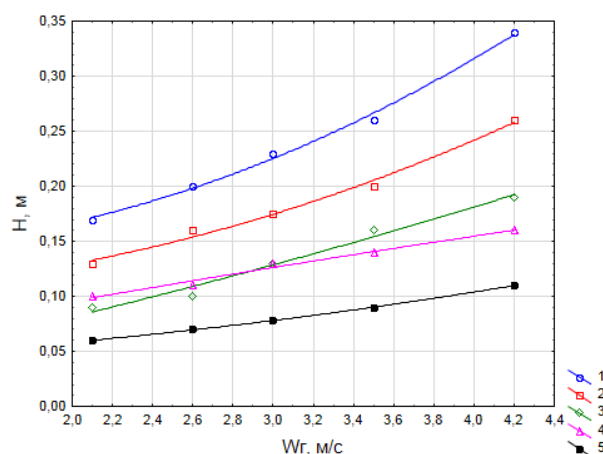


Рис. 8 – Залежність висоти шару піни від швидкості газу в повному перерізі апарату: $L_0 = 5 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{год}$; $d_{mp} = 0,02 \text{ м}$, h_0 : 1 – 0,045; 2 – 0,035; 3, 4 – 0,025; 5 – 0,015 м; 4 – зі стабілізатором, 1, 2, 3, 5 – без стабілізатора

Гідрравлічний опір трубчастих решіток із стабілізатором на 20-30% нижче гідрравлічного опору трубчастих решіток без стабілізатора при однакових

значеннях висоти вихідного шару рідини (рис. 9). Це, можна пояснити великими витратами енергії на подолання газом сухої решітки меншого перетину без стабілізатора.

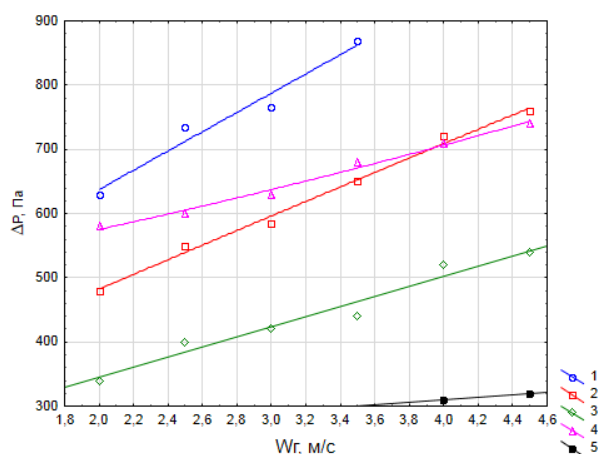


Рис. 9 – Залежність опору решітки з шаром піни від швидкості газу в повному перерізі апарату: h_0 : 1 – 0,045; 2 – 0,035; 3, 4 – 0,025; 5 – 0,015 м; $L_0 = 5 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{год}$. 4 – зі стабілізатором, 1, 2, 3, 5 – без стабілізатора

Таким чином, застосування стабілізатора піни дозволить не тільки підвищити надійність технологічних ліній, в складі яких є пінні апарати з трубчастими решітками, а й знизити витрати енергії на проведення тепло- масообмінних процесів. Крім того, з'являється можливість, витративши однакову кількість енергії, зменшити число ступенів в одному апараті при тій же сумарній висоті піни, що і без стабілізатора.

Висновки

Промислова реалізація методу стабілізації газорідного шару дозволяє значно розширити сферу застосування пінних апаратів і відкриває нові можливості інтенсифікації технологічних процесів з одночасним створенням маловідхідних технологій. У статті встановлено основні параметри, що впливають на гідродинаміку трубчастих решіток із стабілізатором піни і без нього. Виявлено зв'язок гідродинамічних параметрів. Отримані залежності точніше характеризують гідродинамічну обстановку в апараті. Дослідження показують, що застосування стабілізатора значно розширює діапазон стійкої роботи трубчастих решіток в пінних апаратах. Це важливо коли кількість продукції змінюється в широких межах в залежності від потреб технології. Застосування стабілізатора піни дозволить не тільки підвищити надійність технологічних ліній, в складі яких є пінні апарати з трубчастими решітками, а й знизити витрати енергії на проведення тепло- масообмінних процесів.

Список літератури

1. Мухленов, И. П. Пенный режим и пенные аппараты / И. П. Мухленов, Э. Я. Тарат. – М.: Химия. – 1977. – 304 с.
2. Тарат, Э. Я. Интенсивные колонные аппараты для обработки газов жидкостями / Э. Я. Тарат, О. С. Балабеков, Н. П. Болтов. – Л.: Изд. ЛГУ им. А.А.Жданова, 1976. – 244 с.
3. Мухленов, И. П. Абсорбция и пылеулавливание в производстве минеральных удобрений / И. П. Мухленов, О. С. Ковалев. – М.: Химия. – 1987. – 206 с.
4. Гельперин, Н. И. Определение поверхности контакта фаз в массообменном аппарате с псевдооживленной шаровой насадкой / Гельперин, Н. И., Гришко, В. З., Михайлов, В. А. // Теор. основы хим. технол. – 1972. – Т. 6., №4, – с. 534-538.
5. Микулин, Г. И. Дистилляция в производстве соды / Г. И. Микулин, И. К. Поляков. – М., Л.: Госхимиздат, 1956. – 348 с.
6. Perry, D. C. Gas absorption and reaction in a wet pneumatic foam / D. C. Perry, P. Stevenson // *Chemical Engineering Science*. – 2015. – V. 126. – P. 177-185. – doi:10.1016/j.ces.2014.11.037.
7. Marias, F. Effects of Freeboard Volatile Release During Fluidized Bed Incineration of a Model Waste // F. Marias, J. R. Puiggali, G. Flamant // *Process Safety and Environmental Protection*. – 2001. – V. 79, Issue 4, – P. 244-252. – doi:10.1205/095758201750362280.
8. Woźniak, M. An investigation of mass transfer in a countercurrent three-phase fluidized bed // M. Woźniak, K. Østergaard // *Chemical Engineering Science*. – 1973. – V. 28, Issue 1. – P. 167-171. – doi:10.1016/0009-2509(73)85097-3.
9. Yin, F. H. CFD Simulation and Experimental Study of Liquid Dispersion in Randomly Packed Metal Pall Rings / F. H. Yin, A. Afacan, K. Nandakumar, K. T. Chuang // *Chemical Engineering Research and Design*. – 2002. – V. 80, Issue 2. – P.135-144. – doi:10.1205/026387602753501852.
10. Jungkee, Jang. CFD simulation of a pharmaceutical bubbling bed drying process at three different scales / Jungkee Jang, Hamid Arastoopour // *Powder Technology*. – 2014. – V. 263. – P. 14-25. – doi:10.1016/j.powtec.2014.04.054.

Bibliography (transliterated)

1. Mukhlenov, I. P., Tarat, E. Y. A. Penny rezhim i pennyye apparaty. – M.: Khimiya. – 1977. – 304 s.
2. Tarat, E. Y. A., Balabekov, O. S., Boltov, N. P. Intensivnyye kolonnyye apparaty dlya obrabotki gazov zhidkostyami. – L.: Izd. LGU im. A.A.Zhdanova, 1976. – 244 s.
3. Mukhlenov, I. P., Kovalev, O. S. Absorbtsiya i pylulavlaniye v proizvodstve mineral'nykh udobreniy. – M.: Khimiya. – 1987. – 206 s.
4. Gel'perin, N. I., Grishko, V. Z., Mikhaylov, V. A. Opredeleniye poverkhnosti kontakta faz v massoobmennom apparate s psevdoozhivlennoy sharovoy nasadkoy. *Teor. osnovy khim. Tekhnol*, 1972, 6., №4, 534-538.
5. Mikulin, G. I., Polyakov, I. K. Distillyatsiya v proizvodstve sody. – M., L.: Goskhimizdat, 1956. – 348 s.
6. Perry, D. C., Stevenson, P. Gas absorption and reaction in a wet pneumatic foam. *Chemical Engineering Science*, 2015, 126, 177-185. – doi:10.1016/j.ces.2014.11.037.

7. **Marias, F., Puiggali, J. R., Flamant, G.** Effects of Freeboard Volatile Release During Fluidized Bed Incineration of a Model Waste. *Process Safety and Environmental Protection*, 2001, **79**, 4, 244-252. – doi:10.1205/095758201750362280.
8. **Woźniak, M., Østergaard, K.** An investigation of mass transfer in a countercurrent three-phase fluidized bed. *Chemical Engineering Science*, 1973, **28**, 1, 167-171. – doi:10.1016/0009-2509(73)85097-3.
9. **Yin, F. H., Afacan, A., Nandakumar, K., Chuang, K. T.** CFD Simulation and Experimental Study of Liquid Dispersion in Randomly Packed Metal Pall Rings. *Chemical Engineering Research and Design*, 2002, **80**, 2, 135-144. – doi:10.1205/026387602753501852.
10. **Jungkee, Jang, Hamid, Arastoopour.** CFD simulation of a pharmaceutical bubbling bed drying process at three different scales. *Powder Technology*, 2014, **263**, 14-25. – doi:10.1016/j.powtec.2014.04.054.

Відомості про авторів

Моїсєєв Віктор Федорович – кандидат технічних наук, професор Національного Технічного Університету «Харківський Політехнічний Інститут», кафедра Хімічної техніки та промислової екології, м. Харків, Україна.

Victor Moiseev - Candidate of Technical Sciences, Professor National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», Department of Chemical techniques and industrial ecology, Kharkiv, Ukraine.

Манойло Євгенія Володимирівна – кандидат технічних наук, доцент Національного Технічного Університету «Харківський Політехнічний Інститут», кафедра Хімічної техніки та промислової екології, м. Харків, Україна, e-mail: bublikova1@gmail.com.

Eugenia Manoilo - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», Department of Chemical techniques and industrial ecology, Kharkiv, Ukraine; e-mail: bublikova1@gmail.com.

Васильєв Михайло Ілліч – кандидат технічних наук, доцент Національного Технічного Університету «Харківський Політехнічний Інститут», кафедри Хімічної техніки та промислової екології, м. Харків, Україна.

Mykhailo Vasyliiev - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», Department of Chemical techniques and industrial ecology, Kharkiv, Ukraine.

Репко Каліф Юрійович – магістр, аспірант Національного Технічного Університету «Харківський Політехнічний Інститут», кафедра Хімічної техніки та промислової екології, м. Харків, Україна.

Kalif Repko – ph.d. student, National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», Department of Chemical techniques and industrial ecology, Kharkiv, Ukraine.

Давидов Денис Валерійович – студент Національного Технічного Університету «Харківський Політехнічний Інститут», кафедра Хімічної техніки та промислової екології, м. Харків, Україна.

Denys Davydov - Student National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», Department of Chemical techniques and industrial ecology, Kharkiv, Ukraine.

Будь ласка, посилайтеся на цю статтю таким чином:

Моїсєєв, В. Ф. Обробка газорідних систем на трубчатих решітках із стабілізатором пінного шару / **В. Ф. Моїсєєв, Є. В. Манойло, М. І. Васильєв, К. Ю. Репко, Д. В. Давидов** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* - Харків: НТУ «ХПІ». - 2017. – № 53 (1274). – С. 114-123. – doi:10.20998/2413-4295.2017.53.17.

Please cite this article as:

Moiseev, V. F., Manoilo, E. V., Vasyliiev, M. I., Repko, K. Yu., Davydov, D. V. Processing of gas-liquid systems on tubular gratings with stabilizer of a foam layer. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, **53** (1274), 114–123, doi:10.20998/2413-4295.2017.53.17.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Моисеев, В. Ф. Обработка газожидкостных систем на трубчатых решетках со стабилизатором пенного слоя / **В. Ф. Моисеев, Е. В. Манойло, М. И. Васильев, К. Ю. Репко, Д. В. Давыдов** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серія: Новые решения в современных технологиях.* - Харьков: НТУ «ХПИ». - 2017. – № 53 (1274). – С. 114-123. – doi:10.20998/2413-4295.2017.53.17.

АННОТАЦІЯ Промислова реалізація методу стабілізації газожидкостного слоя дозволяє значительно расширить область применения пенных аппаратов и открывает новые возможности интенсификации технологических процессов с одновременным созданием малоотходных технологий. В статье установлены основные параметры, влияющие на гидродинамику трубчатых решеток со стабилизатором пены и без него. Выявлена связь гидродинамических параметров. Полученные зависимости точнее характеризуют гидродинамическую обстановку в аппарате. Приводится влияние наличия стабилизатора на характеристики динамического двухфазного слоя. Рассмотрены гидродинамические закономерности пенного слоя на трубчатых решетках со стабилизатором пены и его влияние на работу аппарата. Показано, что использование стабилизатора снижает брызгоотнесение, а также увеличивает эффективность выделения из газов компонентов, которые трудно уловить.

Ключевые слова: промышленные газовые выбросы; процесс улавливания; гидродинамика; массообмен; пенный аппарат; исследование процессов очищения; стабилизация; пенный слой; интенсивный аппарат.

Поступила (received) 02.12.2017